第38卷 第6期
2021年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 6
Nov. 2021

岱海盆地地下水化学特征及成因

张文琦[1,2]， 董少刚[1,2]， 马铭言[1]， 赵 镇[1]， 陈 悦[1]

（1. 内蒙古大学生态与环境学院；内蒙古 呼和浩特 010021；2. 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010021）

摘　要： 岱海面积日趋萎缩，水质日益恶化，已经对区域生态环境安全造成严重影响。通过水文地质调查、水样采集，结合统计分析、舒卡列夫分类、矿物饱和指数、离子比例分析、氯碱指数等水化学分析方法，对岱海盆地地下水水化学特征及成因进行研究，以期揭示影响岱海区域地下水水环境演化的主要因素。结果表明：(1) 岱海盆地地下水呈弱碱性，水化学类型以 HCO_3–Ca·Mg 型水为主；从盆地边缘到岱海，水化学类型从 HCO_3–Ca 向 Cl–Na 型过渡，控制水化学成分的作用由溶滤作用向蒸发浓缩作用过渡。(2) 地下水水化学组分主要受溶滤、离子交换、脱硫酸以及人为作用控制，其中碳酸盐矿物、硅酸盐矿物、石膏和岩盐的溶解沉淀对地下水化学组分有重要影响。(3) NO_3^-–N 含量受氮肥、人畜粪便排放等人为作用影响；地下水赋存特征对 NO_3^-–N 浓度垂直分布存在明显影响。

关键词： 地下水；水化学特征；水–岩相互作用；岱海盆地

地下水以其分布广泛、容易获取、水质良好等特点，往往成为干旱–半干旱地区重要的供水水源[1]。研究地下水水化学特征不仅能够揭示区域地下水演化规律，而且对流域水资源的可持续循环利用也具有重要指导意义。

地下水的水化学特征主要受气候[2]、地形地貌[3]、含水介质岩性[4–5]、水岩相互作用[6–7]及人类活动[8–9]等多种因素的影响。通常干旱区的山间盆地受含水层沉积环境及地形地貌的影响，山前冲洪积扇区地下水流速较快，溶滤作用强烈，地下水化学类型一般为低TDS的 HCO_3–Ca 型水；盆地中部平原区，含水介质颗粒细小，地下水位埋深浅，在蒸发浓缩作用影响下，可能形成 Cl–Na 型水。在地形平坦的平原区由于地下水位埋深浅且径流缓慢，浅层地下水容易在人类活动影响下，水质出现明显的变化[10]。如农业生产导致地下水中氮化物浓度升高[11–12]；剧烈开采承压水导致潜水向下越流量增大；城市生活垃圾及生活、生产废水对地下水造成的污染[13]等。厘清区域地下水在自然和人类活动共同作用下的演化规律，特别是阐明人类活动在此过程中起到的作用，对区域水资源保护与开发具有重要意义。

干旱区内陆湖泊多为封闭型湖泊，主要接受降水、地表径流和地下径流补给，蒸发为其主要排泄方式，往往形成咸水湖[14–15]。在降水稀少、地表径流被拦截时，地下水的水质水量通过水力交换影响湖泊水均衡，进而导致湖泊水位、面积以及水质的变化[16–20]。国内外学者对地下水–湖泊之间的水力联系做了大量研究，地下水对咸海水量的贡献日益增加，来自阿姆河下游灌区的地下水已成为南咸海最主要的补给来源[17–18]；巩艳萍[19]和王旭升等[20]研究发现，巴丹吉林沙漠中的湖泊多为咸水湖，地下水支持湖泊的蒸散耗水并给湖水提供盐分，同时湖泊群的存在也会影响区域地下水循环模式；沙占江等[21]研究发现，地下水带来的营养盐会对青海湖尕海及湖泊周围生态环境造成一定影响；韩积斌等[22]研究发现，流域范围内地表水和地下水转化对柴达木盆地尕斯库勒盐湖成盐元素的运移和富集具有重要意义。

岱海是内蒙古第三大内陆湖，面积为56.7 km^2

收稿日期： 2021–03–26； **修订日期：** 2021–05–08

基金项目： 内蒙古"一湖两海"科技重大专项项目(ZDZX2018054)；内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS04004)；国家自然科学基金项目(41562020)共同资助

作者简介： 张文琦(1996–)，女，硕士研究生，研究方向为水文地质学. E-mail: 793177079@qq.com

通讯作者： 董少刚. E-mail: groundwater@163.com

(2020年),其在维护区域生态环境稳定中具有重要作用。近年来,由于自然及人为因素的共同干扰,岱海湖泊面积日益萎缩[23],水质不断恶化。岱海为一闭口型湖泊,主要由降水、山区雨季洪流和地下水补给,蒸发为其主要排泄渠道。由于岱海湖水蒸发量远远大于降水量(约3倍)[24-26],且近年来水库截留使地表水对岱海的补给变得很小[25],因此地下水对岱海湖水量及水化学特征的影响日益显著。当前关于岱海盆地的研究主要集中在生态修复[27]、气候变化[28-29]、地表水水量及水化学[30]上,对区域地下水水化学的研究很少[26,30-31]。现有研究表明,区域地下水与河水的TDS值相近[30]、水化学类型相似[31],地下水与河水存在密切联系,河水成份主要受硅酸岩盐的风化溶解控制。本文重点对岱海盆地地下水水化学特征及成因进行研究,以期揭示控制岱海盆地地下水水化学组分形成的主要因素及水化学演化规律,为岱海流域水资源的保护及合理开发利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

岱海盆地(112°21′~112°54′E,40°11′~40°50′N)位于乌兰察布市凉城县。该区属中温带大陆性季风气候,年平均气温5.6 ℃。多年平均降水量和蒸发量分别为395 mm和1820 mm,降水多集中于6—8月,占全年总降水量68%。区内主要河流有天成沟、步量河、五号河、弓坝河,河流和沟谷在雨季有洪水形成。

岱海盆地四周山地环绕,中间为冲洪及湖积平原,岱海位于区内地势最低处。盆地北部低山丘陵地区含水层主要由太古界片麻岩、侏罗系的火山碎屑岩构成,矿物成分主要为长石、石英及少量云母,单井出水量50~100 $m^3 \cdot d^{-1}$。岱海及岱海镇以北的潜水含水层由白垩系和新近系砂岩、砾岩及砂砾岩组成,矿物成分主要为长石、石英等,埋深在30~40 m,厚度约50~60 m,单井涌水量为1000~3000 $m^3 \cdot d^{-1}$。盆地中部冲洪及湖积平原潜水含水层由第四系砂土构成,矿物成分主要为长石、方解石、石膏、岩盐等,岱海周边单井涌水量不足100 $m^3 \cdot d^{-1}$。盆地东部潜水含水层以砂为主,矿物成分主要为长石、石英、霰石及少量的温石棉和海泡石等,单井涌水量为100~500 $m^3 \cdot d^{-1}$。盆地南部的玄武岩台地地区潜水含水层岩性主要为孔洞、节理发育的玄武岩与致密块状玄武岩互层,台地上单井涌水量不足100 $m^3 \cdot d^{-1}$(图1)。区内地下水的补给途径主要有降水入渗补给、山前侧向补给及丰水期的沟谷补给;排泄途径主要为蒸发和人工开采。

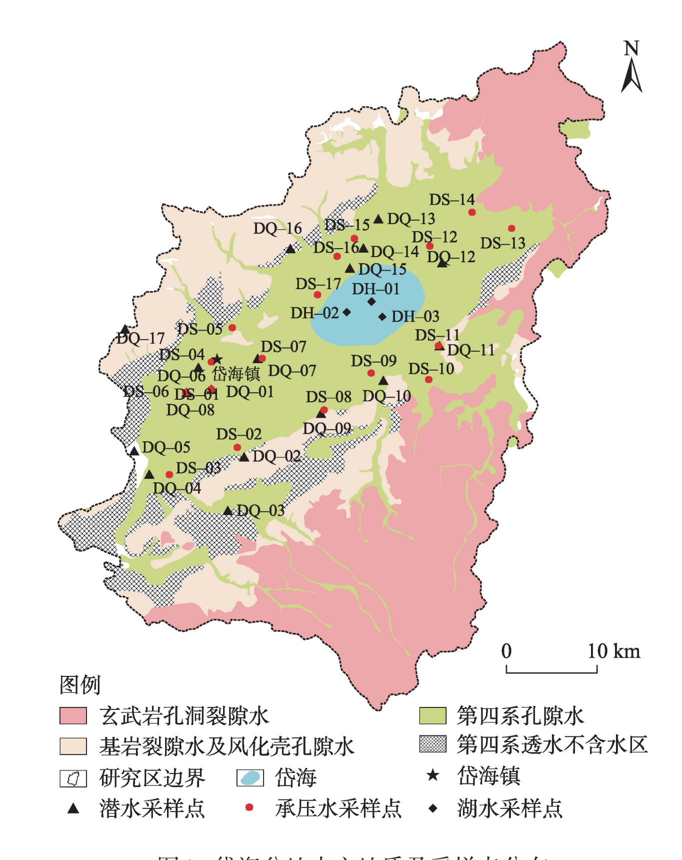


图1　岱海盆地水文地质及采样点分布

Fig. 1　Hydrogeology and sampling site distribution of Daihai Basin

1.2　样品采集与测定

2019年8月,在岱海盆地共布设采样点37个(图1),其中潜水采样点17个,承压水采样点17个,湖水采样点3个。地下水采样点均为居民水井或集中供水水源井,其中DS-02、DS-07为孔隙-裂隙承压水,井深80~100 m,为自喷井,其他皆为孔隙水,井深为5~80 m。采样时应用GPS对每个采样点进行定位,并通过咨询水井所有人了解井深。水样的pH通过便携式pH计在现场测定,经过不间断抽水直到各参数的读数稳定后进行记录,并取样。

在实验室内,用火焰光度计分析水样中的可溶性金属Na^+、K^+,用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定Ca^{2+}、Mg^{2+},用银量滴定法测定Cl^-,用乙二胺四乙酸二钠-钡滴定法测定硫酸根,用滴定法测定HCO_3^-和

NO_3^-，用硫氰酸盐分光光度法测定Fe^{2+}、Fe^{3+}，用二磺酸酚分光光度法测定NO_3^-，用茜素络合剂比色法测定氟化物，用火焰原子吸收光谱法测定Mn，用气液分离氢化物原子荧光法测定As，用二苯碳酰二肼分光光度法测定Cr^{6+}，用酸性高锰酸盐氧化法测定COD，用重量法进行测量TDS。使用阴阳离子平衡法对所测数据进行检验，相对误差在5%之内，说明测得数据可靠。

1.3 数据分析方法

运用SPSS 26.0软件对水样中离子组分浓度进行描述性统计，采用舒卡列夫分类法对区域地下水化学类型进行分类，并通过离子浓度比值、氯碱指数和矿物饱和指数等方法分析研究区不同控制因素作用下地下水化学特征及成因。运用Surfer 8绘制NO_3^--N等值线图并分析其空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 水化学特征统计分析

从监测指标统计结果来看(表1)，岱海湖水pH平均值为9.1，呈碱性；TDS平均值为11683.1 mg·L^{-1}。岱海湖是一个封闭的湖泊，长期受蒸发浓缩作用影响，已经成为一个咸水湖。

研究区地下水普遍处于弱碱性环境，潜水和承压水平均pH值分别为7.8和8.0。潜水TDS平均浓度为386.0 mg·L^{-1}；承压水TDS平均浓度为383.7 mg·L^{-1}。潜水主要离子的质量浓度排序为阳离子：Ca^{2+}>Na^+>Mg^{2+}>K^+，阴离子：HCO_3^->Cl^->SO_4^{2-}；承压水的主要离子的质量浓度排序为阳离子：Ca^{2+}>Na^+>Mg^{2+}>K^+，阴离子：HCO_3^->Cl^->SO_4^{2-}；岱海水的主要离子的质量浓度排序为阳离子：Na^+>Mg^{2+}>Ca^{2+}>K^+，阴离子：Cl^->HCO_3^->SO_4^{2-}。

变异系数(C_V)是标准差与相应平均值的商值，可用来衡量数据的离散程度。潜水与承压水中NO_3^--N的变异系数分别为1.3、0.8，表明其在空间上变化程度较大。研究区农业、畜牧业发达，农业施肥、动物粪便以及生活污水的排放都是硝酸盐的主要来源。所采水样有58.8%的潜水水样、29.4%的承压水水样硝酸盐含量超过GB/T 14848-2017《地下水质量标准》[32]所规定的Ⅲ类水标准限值(≤20 mg·L^{-1})，最高值可达157.5 mg·L^{-1}。地下水硝酸盐含量多处超标而湖水硝酸盐含量很低，这可能是由于岱海已经处于强还原环境，反硝化作用强烈，硝态氮在湖水中无法稳定存在。

2.2 区域地下水化学类型及分区

利用舒卡列夫分类法对区域水化学类型进行分析(表2)，潜水和承压水中均以HCO_3-Ca·Mg型水为主。潜水水样中，9个属于HCO_3-Ca·Mg型水，4个属于HCO_3-Ca型水，HCO_3·Cl-Ca·Na型水、HCO_3·Cl-Ca·Mg型水、HCO_3·SO_4-Mg·Ca型水、HCO_3-Na·Ca型水各1个。承压水水样中，10个属

表1 研究区潜水和承压水监测指标的统计分析结果

Tab. 1 Statistics of chemical data for unconfined and confined water in the study area /(mg·L^{-1})

指标		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^--N	TDS	pH
岱海湖水	平均值	6.6	4060.0	24.0	265.2	6541.1	144.0	1281.2	–	11683.1	9.1
	最大值	6.7	4086.0	24.6	269.1	6578.0	148.0	1284.2	–	11744.4	9.2
	最小值	6.5	4032.0	23.2	259.1	6501.4	139.0	1275.5	–	11603.0	9.0
	标准差	0.1	27.1	0.7	5.4	38.4	4.6	5.0	–	72.6	0.1
潜水	平均值	1.0	32.9	66.2	24.5	39.6	38.7	265.5	32.3	386.0	7.8
	最大值	2.0	117.9	140.3	63.2	159.5	144.0	347.7	157.5	779.5	8.1
	最小值	0.4	12.4	40.1	7.3	10.6	–	183.0	7.01	215.7	7.6
	标准差	0.5	29.2	24.3	14.0	46.6	35.9	41.0	40.8	158.2	0.1
	变异系数	0.5	0.9	0.4	0.6	1.2	0.9	0.2	1.3	0.4	0.0
承压水	平均值	1.1	51.5	54.8	20.5	42.4	40.1	277.0	16.1	383.7	8.0
	最大值	3.5	290.0	70.1	40.1	241.1	153.6	488.1	52.1	935.8	8.2
	最小值	0.4	12.9	14.0	9.7	14.2	–	213.5	–	243.8	7.6
	标准差	0.7	78.4	12.9	8.2	57.5	38.3	75.8	13.1	198.8	0.2
	变异系数	0.6	1.5	0.2	0.4	1.4	1.0	0.3	0.8	0.5	0.0

注：“–”表示低于检出限。

表2　研究区地下水化学类型分类表

Tab. 2　Classification of groundwater chemical types in the study area

	类型	个数	采样点
潜水	HCO_3-Ca·Mg	9	DQ-02、DQ-04、DQ-05、DQ-06、DQ-08、DQ-11、DQ-12、DQ-13、DQ-14
	HCO_3-Ca	4	DQ-01、DQ-03、DQ-16、DQ-17
	HCO_3·Cl-Ca·Na	1	DQ-07
	HCO_3·Cl-Ca·Mg	1	DQ-09
	HCO_3·SO_4-Mg·Ca	1	DQ-10
	HCO_3-Na·Ca	1	DQ-15
承压水	HCO_3-Ca·Mg	10	DS-01、DS-02、DS-03、DS-04、DS-09、DS-12、DS-13、DS-14、DS-15、DS-17
	HCO_3-Ca·Na	3	DS-07、DS-10、DS-11
	HCO_3-Ca	2	DS-05、DS-06
	HCO_3·Cl-Na	2	DS-08、DS-16

于HCO_3-Ca·Mg型水,3个属于HCO_3-Ca·Na型水,HCO_3-Ca型水、HCO_3·Cl-Na型水各2个。岱海湖水属于Cl-Na型水。

由于地形地貌、含水层岩性及地下水径流条件的不同,岱海盆地地下水水化学类型的形成及空间分布具有一定差异。沿流动方向上,地下水水化学组分发生有规律的变化,整个区域潜水和承压水明显划为3个水化学类型分区(图2)。潜水与承压水水化学类型分区相似,在山前冲洪积扇的扇顶位置(Ⅰ区),含水层介质粗大,受山区季节性地表径流影响,地下水主要为HCO_3-Ca型水,TDS较低,为270~350 mg·L^{-1};在冲洪积扇中部(Ⅱ区),主要为HCO_3-Ca·Mg型水,水化学成分以溶滤作用为主,TDS略有上升,为250~450 mg·L^{-1};在冲洪积扇的扇缘及盆地中部(Ⅲ区),地下水位埋深不足3 m,含水层以粉砂为主,水化学成分的形成以浓缩作用为主,Na^+、Cl^-含量增多。岱海是盆地地下水的最终汇聚地,地下水转化为地表水,由于蒸发作用强烈,形成Cl-Na型水,TDS高达11683 mg·L^{-1}。基于区域潜水与承压水水化学类型及宏量离子浓度的相似性上分析,该区潜水与承压水可能具有较紧密的水力联系。

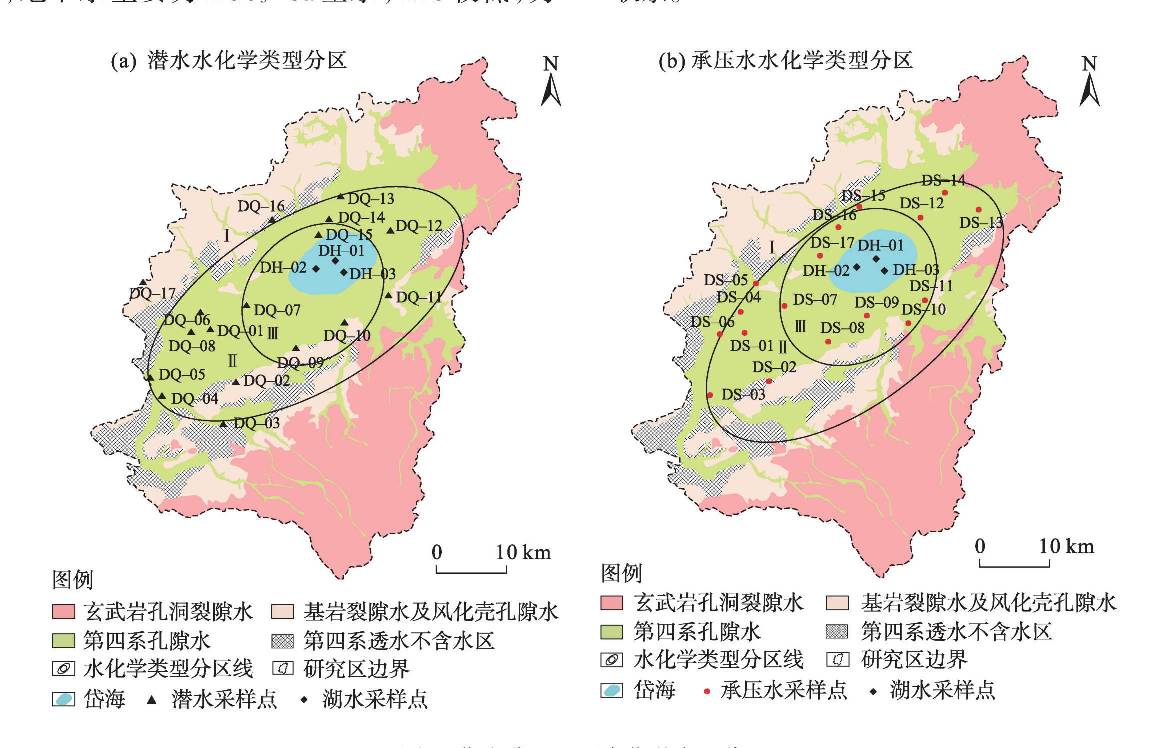


图2　岱海盆地地下水化学类型分区

Fig. 2　Zoning map of groundwater chemical types in Daihai basin

2.3 水化学作用及主要组分来源分析

2.3.1 溶滤作用 地下水矿物饱和指数(SI)范围如表3、图3所示。由于饱和指数的计算带有不确定性，一般认为，SI在−0.5~0.5之间为溶解平衡状态。全部水样石膏和岩盐SI值均小于−0.5，说明这些矿物处于溶解未饱和状态，石膏和岩盐会发生溶解。88.2%水样的温石棉SI值和82.4%水样的海泡石SI值均小于−0.5，说明大部分区域地下水环境中的温石棉、海泡石会产生溶解。76.5%水样的方解石SI值和47.1%水样的霰石SI值大于0.5，可判断部分区域地下水环境中的方解石和霰石呈沉淀趋势，由于SI值较小(＜1)，微量方解石、霰石产生沉淀。91.1%水样的白云石SI值大于0.5，67.6%大于1，说明白云石正发生沉淀。

表3 矿物饱和指数范围及沉淀溶解方程

Tab. 3 Mineral saturation index range and precipitation solution equation

矿物	饱和指数范围	溶解沉淀方程
生石膏	−3.24~−1.86	$CaSO_4=Ca^{2+}+SO_4^{2-}$
霰石	0.11~0.83	$CaCO_3=Ca^{2+}+CO_3^{2-}$
方解石	0.26~0.97	$CaCO_3=Ca^{2+}+CO_3^{2-}$
白云石	0.24~2.10	$CaMg(CO_3)_2=Ca^{2+}+Mg^{2+}+2CO_3^{2-}$
石膏	−3.02~−1.64	$CaSO_4\cdot 2H_2O=Ca^{2+}+SO_4^{2-}+2H_2O$
温石棉	−4.24~−0.16	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4+6H^+=H_2O+2H_4SiO_4+3Mg^{2+}$
海泡石	−3.02~0.20	$Mg_2Si_3O_{7.5}OH\cdot 3H_2O+4H^++0.5H_2O=2Mg^{2+}+3H_4SiO_4$
滑石	−0.51~4.14	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2+4H_2O+6H^+=3Mg^{2+}+4H_4SiO_4$
岩盐	−8.45~−5.89	$NaCl=Na^++Cl^-$

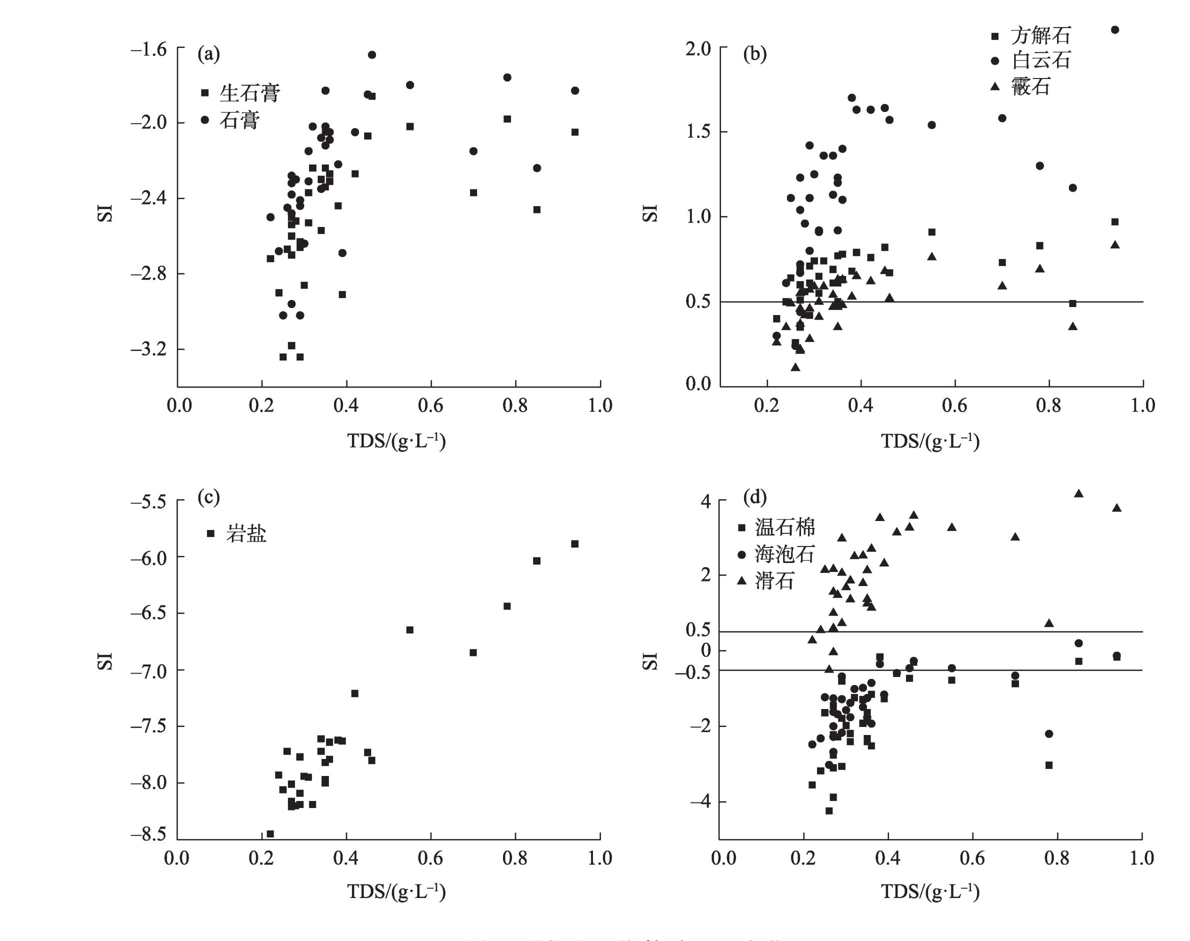


图3 矿物饱和指数随TDS变化

Fig. 3 Variation of saturation index with TDS

地下水化学分析中，$\gamma(Na^+ + K^+)$与$\gamma(Cl^-)$比值关系可以判断地下水环境中是否有硅酸盐矿物溶解[33]。研究区多数样点落在$\gamma((Na^+ + K^+)/\gamma(Cl^-)=1$上方（图4a），且相关性分析表明（表4），$Na^+-Cl^-$和$Na^+-SiO_2$相关系数分别为0.764和0.744，呈高度相关，说明除岩盐外，Na^+还可能来自钠长石($Na_2O\cdot Al_2O_3\cdot 6SiO_2$)等硅酸盐矿物的风化溶解。此外，$\gamma(Na^+ + K^+)$与$\gamma(Cl^-)$比值大于1，说明地下水受到明显的阳离子交换作用影响，使$Na^+ + K^+$浓度高于Cl^-浓度。

$\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+})$与$\gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$的比值常用来判断影响地下水化学成分的主导水岩作用。多数点位$\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+})$与$\gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$的比值远小于1（图4b），说明这些区域主导的水岩作用为硅酸盐溶解，反应方程为：(Na/Mg/Ca/K)硅酸盐$+H_2CO_3 \rightarrow H_4SiO_4 + HCO_3^- + (Na^+/K^+/Mg^{2+}/Ca^{2+})$+黏土。

综合矿物饱和指数分析、相关性分析、离子比例分析可知，方解石、白云石及霰石等碳酸盐矿物、温石棉、海泡石和钠长石等硅酸盐矿物、石膏和岩盐溶解沉淀对地下水的化学组分有重要影响。其中，温石棉、海泡石、钠长石、岩盐和石膏的溶解是

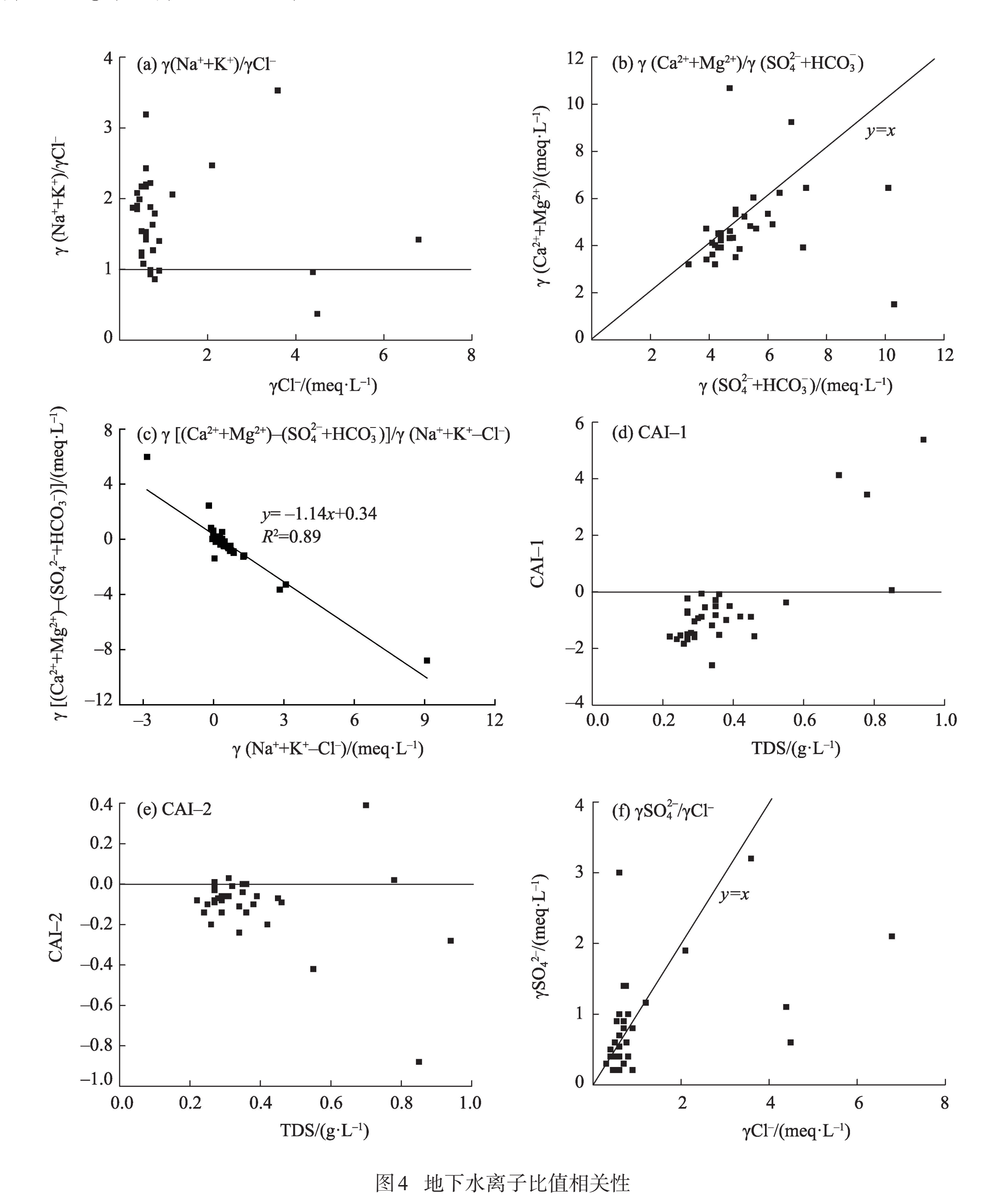


图4 地下水离子比值相关性

Fig. 4 Correlation diagram of iron ratio in groundwater

表4 地下水中各离子相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of groundwater water

	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	SiO_2	TDS	pH
K^+	1										
Na^+	0.783**	1									
Ca^{2+}	−0.174	−0.174	1								
Mg^{2+}	0.206	0.051	0.409*	1							
Cl^-	0.595**	0.764**	0.380*	0.470**	1						
SO_4^{2-}	0.734**	0.706**	−0.146	0.292	0.483**	1					
HCO_3^-	0.586**	0.871**	−0.050	0.285	0.765**	0.612**	1				
NO_3^-	0.063	−0.056	0.819**	0.616**	0.445**	−0.094	0.044	1			
SiO_2	0.794**	0.744**	−0.314	−0.079	0.399*	0.669**	0.495**	−0.118	1		
TDS	0.716**	0.846**	0.299	0.482**	0.942**	0.696**	0.850**	0.405*	0.554**	1	
pH	0.533**	0.503**	−0.389*	0.138	0.213	0.555*	0.478**	−0.205	0.466**	0.369*	1

注:**表示显著水平为0.01;*表示显著水平为0.05。

主导的水岩作用。

2.3.2 离子交换作用 $\gamma(Na^++K^+-Cl^-)$与$\gamma[Ca^{2+}+Mg^{2+}-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]$的比值常用来验证研究区是否发生阳离子交换作用。如图4c所示,$\gamma(Na^++K^+-Cl^-)$与$\gamma[Ca^{2+}+Mg^{2+}-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]$的比值接近−1,说明地下水环境中存在明显的阳离子交换作用。通过氯碱指数判断离子交换作用的方向,CAI−1=$[Cl^--(Na^++K^+)]/Cl^-$、CAI−2=$[Cl^--(Na^++K^+)]/(SO_4^{2-}+HCO_3^-+CO_3^{2-}+NO_3^-)$。如图4d、图4e所示,CAI−1、CAI−2均小于0时,说明发生了正向阳离子交换作用,地下水中的Ca^{2+}、Mg^{2+}含量减小,Na^+和K^+含量增加。DQ−07和DQ−09等个别位点氯碱指数均为正值,说明该区域发生了逆向阳离子交换作用。因此,研究区地下水环境中的Na^+含量主要受岩盐、钠长石的溶解以及阳离子交换作用的影响。

2.3.3 脱硫酸作用 $\gamma(SO_4^{2-})$与$\gamma(Cl^-)$的比值常用来表示脱硫酸作用的程度,脱硫酸作用会使地下水中SO_4^{2-}含量降低,HCO_3^-含量增加。$\gamma(SO_4^{2-})$与$\gamma(Cl^-)$的比值越小(图4f),脱硫酸作用越强烈,HCO_3^-产生的越多。DQ−07、DQ−09、DQ−15、DS−08、DS−16等样点地下水埋深大,$\gamma(SO_4^{2-})$与$\gamma(Cl^-)$的比值半数落在1:1线下方,说明这些区域脱硫酸作用强烈。

2.3.4 人为作用 岱海盆地地下水化学特征总体受地下水流场控制,潜水局部区域在人类活动影响下出现较严重的氮污染现象,由于潜水和承压水存在水力联系,承压水水质也呈现恶化趋势。

从NO_3^-−N浓度分布图可以看出(图5),潜水和承压水中硝态氮浓度超标的区域均分布于湖泊南部的岱海镇周边。相较于东、西、北部,湖泊南部地域广阔、地势平坦、农田分布广、人口密度大[34],人

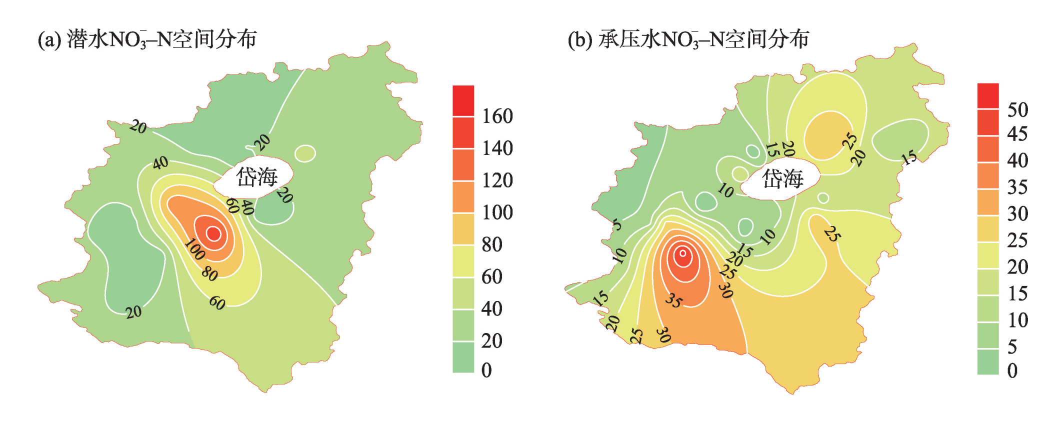


图5 地下水 NO_3^-−N空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of NO_3^-−N in groundwater

类活动对地下水环境的影响更为强烈。农田氮肥的过量施用、生活污水的排放及人畜粪便均为地下水硝态氮的污染源[35-36]。由于盆地南部第四系潜水含水层埋深浅,包气带通透性好,地下水处于氧化环境,有利于硝态氮在地下水中的赋存及累积,进一步导致这一区域地下水硝态氮浓度升高。由于隔水层分布不连续及厚度较薄,该区潜水与承压水存在较紧密的水力联系,潜水向承压水的越流导致潜水氮化物浓度高的区域承压水 NO_3^--N浓度也偏高。承压水所处环境相对封闭,氧化还原电位较潜水低,硝态氮存在反硝化的可能,使其硝态氮浓度较潜水明显降低,可见地下水赋存特征对 NO_3^--N浓度垂直分布存在明显影响。

3 结 论

岱海盆地区域地下水化学特征主要受地下水径流状况及水-岩相互作用控制,局部区域受人类活动影响明显。

(1) 岱海湖水TDS平均浓度为11683.1 mg·L^{-1},pH平均值为9.1,是一个微咸碱性湖泊;岱海水主要来源于大气降水、山区季节性洪流及地下水,近年来随着湖泊面积萎缩、山区修建水库截留,地下水对岱海的补给比例日益增加。

(2) 盆地地下水普遍处于弱碱性环境,潜水与承压水的优势阳离子均为 Ca^{2+},优势阴离子均为 HCO_3^-。潜水TDS平均浓度为386.0 mg·L^{-1};承压水TDS平均浓度为383.7 mg·L^{-1}。

(3) 岱海盆地地下水化学类型以 HCO_3-Ca·Mg型水为主;从盆地边缘到岱海,水化学类型从 HCO_3-Ca向Cl-Na型过渡,控制水化学成分的作用由溶滤作用转向蒸发浓缩作用;基于区域潜水与承压水水化学类型及宏量离子浓度的相似性上分析,该区潜水与承压水可能具有较紧密的水力联系。

(4) 研究区地下水化学组分主要受溶滤作用、离子交换作用、脱硫酸作用控制。碳酸盐矿物(方解石、白云石及霰石)、硅酸盐矿物(温石棉、海泡石和钠长石)、石膏和岩盐溶解沉淀对地下水的化学组分有重要影响。硅酸盐矿物及岩盐和石膏的溶解是主导的水岩作用。

(5) Na^+与Cl^-主要来源于岩盐的溶解,此外,Na^+、K^+含量还受长石类矿物的溶解以及离子交换作用的影响。Ca^{2+}含量主要受石膏、方解石、白云石的溶解沉淀以及离子交换作用的影响。Mg^{2+}主要来源于硅酸盐矿物温石棉和海泡石的溶解。SO_4^{2-}含量受石膏的溶解及脱硫酸作用的影响。HCO_3^-含量主要受碳酸盐的溶解以及脱硫酸作用的影响。NO_3^--N含量受农业氮肥、人畜粪便等人为作用的影响。

参考文献(References):

[1] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社. 2018. [Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, et al. Foundation of Hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 2018.]

[2] 刘白薇, 董少刚, 唐仲华, 等. 内蒙古土默川平原地下水化学季节性变化特征[J]. 工程勘察, 2020, 48(5): 34-40. [Liu Baiwei, Dong Shaogang, Tang Zhonghua, et al. Seasonal changes of groundwater chemistry in Tumochuan Plain of Inner Mongolia[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2020, 48(5): 34-40.]

[3] 王磊, 董少刚, 王雪欣, 等. 内蒙古托克托县"神泉"水文地球化学特征及成因研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1140-1147. [Wang Lei, Dong Shaogang, Wang Xuexin, et al. Hydrogeochemical characteristics and origin of "Shenquan" in Tuoketuo County, Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1140-1147.]

[4] 侯庆秋, 董少刚, 张旻玮. 内蒙古四子王旗浅层地下水水化学特征及其成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 116-121. [Hou Qingqiu, Dong Shaogang, Zhang Minwei. Chemical characteristics and genesis of shallow groundwater in Siziwang Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(4): 116-121.]

[5] 任晓辉, 吴玺, 高宗军, 等. 酒泉东盆地地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 109-116. [Ren Xiaohui, Wu Xi, Gao Zongjun, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanisms of groundwater in Jiuquan east basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (10): 109-116.]

[6] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 等. 甘肃省榆中盆地地下水化学演化特征及控制因素[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2): 194-201. [Lyu Xiaoli, Liu Jingtao, Zhu Liang, et al. Characteristics and controlling factors of chemical evolution of groundwater in Yuzhong basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(2): 194-201.]

[7] 郝艳茹, 王鹏, 张明珠, 等. 广花盆地地下水化学特征及其演化分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 337-344. [Hao Yanru, Wang Peng, Zhang Mingzhu, et al. Hydrochemical characteristic and its driving force of groundwater in the covered karst in Pearl River Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 337-344.]

[8] 李政葵, 夏蔓宏, 董少刚, 等. 洛阳盆地浅层地下水化学特征及其演化特征分析[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 57-63. [Li Zheng-

kui, Xia Manhong, Dong Shaogang, et al. Hydrochemical characteristics and evolution characteristics of shallow groundwater in the Luoyang Basin[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 57-63.]

[9] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1197-1206. [Lyu Xiaoli, Liu Jingtao, Han Zhantao, et al. Chemical evolution of groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the process of urbanization[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1197-1206.]

[10] 李政红, 张翼龙, 胡波, 等. 人类活动对内蒙古托克托县浅层地下水 NO_3^--N 污染的驱动作用[J]. 地球学报, 2018, 39(3): 358-364. [Li Zhenghong, Zhang Yilong, Hu Bo, et al. Driving action of human activities on NO_3^--N pollution in confined groundwater of Togtoh County, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(3): 358-364.]

[11] 冯海波, 董少刚, 王立新, 等. 潜水与承压水"三氮"污染空间分布及成因分析——以内蒙古托克托地区为例[J]. 中国农村水利水电, 2017, 57(4): 91-96. [Feng Haibo, Dong Shaogang, Wang Lixin, et al. Spatial distribution and origin of "Three-nitrogen compounds" in confined and unconfined water of Toketuo County, Inner Mongolia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, 57(4): 91-96.]

[12] 庞园, 李志威, 张明珠. 广花盆地地下水三氮时空分布特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 916-925. [Pang Yuan, Li Zhiwei, Zhang Mingzhu. Analysis of spatial-temporal distribution and influencing factors of Three-nitrogen in groundwater Guanghua Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 916-925.]

[13] 周文武, 陈冠益, 穷达卓玛, 等. 拉萨垃圾填埋场地下水环境质量影响分析研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(4): 20-23, 51. [Zhou Wenwu, Chen Guanyi, Qiongdazhuoma, Impact study of landfill on groundwater environmental quality in Lhasa[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(4): 20-23, 51.]

[14] 赵景峰, 秦大河, 长岛秀树, 等. 博斯腾湖的咸化机理及湖水矿化度稳定性分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 475-482. [Zhao Jingfeng, Qin Dahe, Nagashima Hideki, et al. Analysis of mechanism of the salinization process and the salinity variation in Bosten lake[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 475-482.]

[15] 盛东, 李俊峰, 孙飞飞, 等. 干旱区内陆湖泊水盐变化及调控机理[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 529-535. [Sheng Dong, Li Junfeng, Sun Feifei, et al. Study on water-salt change of some inland lakes in arid areas and the control mechanism[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 529-535.]

[16] 杨立彬, 黄强, 武见, 等. 红碱淖湖泊面积变化影响因素及预测分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 74-78. [Yang Libin, Huang Qiang, Wu Jian, et al. Influence factors and prediction on area change of lake Hongjiannao[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 74-78.]

[17] Jarsjö J, Destouni G. Groundwater discharge into the Aral Sea after 1960[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 47(1): 109-120.

[18] Schettler G, Oberhänsli H, Stulina G, et al. Hydrochemical water evolution in the Aral Sea Basin. Part I: Unconfined groundwater of the Amu Darya Delta-Interactions with surface waters[J]. Journal of Hydrology, 2013, 495: 267-284.

[19] 巩艳萍. 巴丹吉林沙漠地下水对湖泊水均衡及其盐分变化的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Gong Yanping. The Impacts of Groundwater on Lakes in the Badain Jaran Desert Relevant to Water Balance and Salts Variation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]

[20] 王旭升, 胡晓农, 金晓媚, 等. 巴丹吉林沙漠地下水与湖泊的相互作用[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 91-99. [Wang Xusheng, Hu Xiaonong, Jin Xiaomei, et al. Interactions between groundwater and lakes in Badain Jaran Desert[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 91-99.]

[21] 沙占江, 拉本, 孔凡翠, 等. 青海湖尕海地下水输入及其物质通量[J]. 地质学报, 2015, 89(增刊): 282-285. [Sha Zhanjiang, La Ben, Kong Fancui, et al. Groundwater input and material flux in Gahai Lake, Qinghai[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(Suppl.): 282-285.]

[22] 韩积斌, 许建新, 徐凯, 等. 柴达木盆地尕斯库勒盐湖地表水-地下水的转化与铀的补给通量[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1738-1748. [Han Jibin, Xu Jianxin, Xu Kai, et al. The exchange relationship of surface water-groundwater and uranium flux in the Gas Hure Salt Lake of northwest Qaidam Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1738-1748.]

[23] 刘旭隆. 岱海湖泊面积与水位动态变化及其驱动力分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019. [Liu Xulong. Analysis on Dynamic Changes of Lake Area and Water Level and Driving Force in Daihai Lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.]

[24] 孙占东, 姜加虎, 王润. 岱海水盐变化原因及影响研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 264-268. [Sun Zhandong, Jiang Jiahu, Wang Run. Study on the causes and impacts of water-salt change of the Daihai Lake[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(2): 264-268.]

[25] 周云凯, 姜加虎. 近50年岱海生态与环境变化分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 162-168. [Zhou Yunkai, Jiang Jiahu. Changes in the ecological environment in the Daihai Lake Basin over the last 50 Years[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(2): 162-168.]

[26] 陈建生, 季弼宸, 刘震, 等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 521-530. [Chen Jiansheng, Ji Bichen, Liu Zhen, et al. Isotopic and hydro-chemical evidence on the origin of groundwater through deep-circulation ways in Lake Daihai region, Inner Mongolia plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 521-530.]

[27] 王书航, 白妙馨, 陈俊伊, 等. 典型农牧交错带山水林田湖草生态保护修复——以内蒙古岱海流域为例[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 515-519. [Wang Shuhang, Bai Miaoxin, Chen Junyi, et al. Research on the ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in typical farming-pastoral ecotone: Taking Daihai Lake Basin in Inner Mongolia

as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 515−519.]

[28] 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 全新世以来岱海盆地植被演替和气候变化的孢粉学证据[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 73−80. [Xu Qinghai, Xiao Jule, Toshio Nakamura, et al. Pollen evidence of vegetation and climate changes in Daihai Lake area during the Holocene[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 73−80.]

[29] 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 孢粉记录的岱海盆地1500年以来气候变化[J]. 第四纪研究, 2004, 87(3): 341−347. [Xu Qinghai, Xiao Jule, Toshio Nakamura, et al. Climate changes of Daihai Basin during the past 1500 from a pollen record[J]. Quaternary Sciences, 2004, 87(3): 341−347.]

[30] 张飞. 青海湖和岱海流域水化学特征及现代化学风化作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. [Zhang Fei. Water Chemistry and Chemical Weathering at Lake Qinghai and Lake Daihai Catchments[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.]

[31] 刘培桐, 王华东, 潘宝林, 等. 岱海盆地的水文化学地理特征及其在农业生产中的意义[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1964, 9(1): 83−101. [Liu Peitong, Wang Huadong, Pan Baolin, et al. Hydrochemical and geographical characteristics of the Daihai Basin and its significance in agricultural production[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1964, 9(1): 83−101.]

[32] 中国地质调查局. 地下水质量标准(GB/T 14848−2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [China Geological Survey. Standard for Groundwater Quality (GB/T 14848−2017)[S]. Beijiang: China Standards Press, 2017.]

[33] 卞跃跃, 赵丹, 韩永, 等. 兖州煤田奥陶系灰岩地下水水化学特征及其形成机理[J]. 地球学报, 2017, 38(2): 236−242. [Bian Yueyue, Zhao Dan, Han Yong, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of ordovician limestone groundwater in the Yanzhou coalfield[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (2): 236−242.]

[34] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例(2000—2018年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 727−738. [Liang Xu, Liu Huamin, Ji Meichen, et al. Effects of land use/ cover change on lake water quality in the semi-arid region of northern China: A case study in Lake Daihai Basin (2000−2018)[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 727−738.]

[35] 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 等. 青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3232−3241. [Kou Xinyue, Ding Junjun, Li Yuzhong, et al. Identifying the sources of groudwater NO_3^-−N in agricultural region of Qingdao[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3232−3241.]

[36] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 东山岛地下水“三氮”空间分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3203−3211. [Wu Haiyan, Fu Shifeng, Cai Xiaoqiong, et al. Spatial variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in groundwater of Dongshan Island[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3203−3211.]

Chemical characteristics and origin of groundwater in the Daihai basin

ZHANG Wenqi[1,2], DONG Shaogang[1,2], MA Mingyan[1], ZHAO Zhen[1], CHEN Yue[1]

(1. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of River and Lake Ecology, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Daihai area is shrinking daily and water quality is deteriorating, which is adversely impacting regional ecological environment security. This study examined the characteristics and origin of groundwater in the Daihai basin using hydrogeological surveys, water sample collection, statistical analysis, Shukarev classification, ion proportion coefficients, and mineral saturation indices. The results show (1) Daihai lake is slightly salty alkaline. (2) Groundwater in the Daihai basin is weakly alkaline and the hydrochemical profile is mainly HCO_3−Ca·Mg water. From the edge of the basin to Daihai, the hydrochemical profile transitions from HCO_3−Ca to Cl−Na, which controls the action of hydrochemical component transition from leaching to evaporation and concentration. (3) The hydrochemistry of groundwater is mainly controlled by leaching, ion exchange, desulfurization acid, and human action, among which the dissolution and precipitation of carbonate minerals, silicate minerals, gypsum, and rock salt largely influence the chemical composition of groundwater. (4) Finally, NO_3^-−N content was influenced by human activity, such as nitrogen fertilizers and human and animal manure discharge. Combined, these groundwater characteristics can significantly affect the vertical distribution of NO_3^-−N concentrations.

Keywords: groundwater; hydrochemical characteristics; water-rock interaction; Daihai basin